

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE AGRONOMIA

ARTHUR HENRIQUE BORGES DO CARMO

**ATRIBUTOS DA FERTILIDADE DO SOLO PARA CASOS CAMPEÕES DE
PRODUTIVIDADE DE SOJA**

Uberlândia – MG

Abril – 2024

ARTHUR HENRIQUE BORGES DO CARMO

**ATRIBUTOS DA FERTILIDADE DO SOLO EM CASOS CAMPEÕES DE
PRODUTIVIDADE DE SOJA NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Agronomia

Área de concentração: Fertilidade do
Solo

**Orientador: Prof. Dr. Wedisson
Oliveira Santos**

Uberlândia-MG

Abril-2024

ARTHUR HENRIQUE BORGES DO CARMO

**Atributos da fertilidade do solo em casos campeões de produtividade de soja no
Brasil**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Agronomia da
Universidade Federal de Uberlândia
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel em Agronomia

Orientador: Prof. Dr. Wedisson Oliveira
Santos

Uberlândia – 22/04/2024

Banca examinadora:

Wedisson Oliveira Santos - UFU

Poliana Silva Franco Ferreira - UFU

Rafael Resende Finzi - UFU

RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho avaliar o relacionamento entre atributos da fertilidade do solo e as elevadas produtividades de soja no Brasil. Foram analisados dados referentes à atributos químicos do solo de áreas campeãs do desafio nacional de máxima produtividade de soja promovido pelo Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB). Consideraram-se os seguintes atributos do solo: pH, K, Mg, Ca, Al^{3+} , CTC, P, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, V e M.O, para camadas de solo estratificadas em 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. Para cada variável, nas diferentes profundidades investigou-se a existência de correlação (Pearson a 5%) com as produtividades obtidas. Além disso, empregou-se aos dados a estatística descritiva (média, máximo, mínimo e moda). Houve correlação significativa entre os teores de K, Mg, Cu e M.O com a produtividade em todas as camadas de solo; Ca, até a camada 10-20 cm, para CTC e Mn, até a camada 20-40 cm; e para Zn, apenas na camada 40-60 cm. Para acidez ativa, acidez trocável, P, S, B, Fe e V% não foi observada correlação com a produtividade. Esses resultados apontam que os níveis críticos de nutrientes, pré-concebidos, estão descaracterizados em ambientes com perfil de solo construído. O incremento da fertilidade do solo em profundidade é essencial para a obtenção de elevadas produtividades de soja. A construção da fertilidade do solo até 60 cm de profundidade parece diminuir expressivamente o nível crítico de nutrientes no solo na camada superficial para a cultura da soja.

Palavras-chave: produção de soja; química do solo; nutrientes; nutrição de plantas; perfil de solo.

ABSTRACT

The objective of this work was to evaluate the relationship between soil fertility attributes and high soybean yields in Brazil. Data relating to the chemical attributes of the soil in areas that were champions of the national challenge for maximum soybean productivity promoted by the Brazilian Soy Strategic Committee (CESB) were analyzed. The following soil attributes were considered: pH, K, Mg, Ca, Al^{3+} , cation exchange capacity (CEC), P, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn, V and organic matter (OM), for soil layers stratified in 0-10, 10 -20, 20-40 and 40-60 cm. For each variable, at different depths, the existence of a correlation (Pearson at 5%) with the yields obtained was investigated. Furthermore, descriptive statistics (mean, maximum, minimum and mode) were used on the data. There was a significant correlation between the levels of K, Mg, Cu and OM with productivity in all soil layers; Ca, up to the 10-20 cm layer, for CEC and Mn, up to the 20-40 cm layer; and for Zn, only in the 40-60 cm layer. For active acidity, exchangeable acidity, P, S, B, Fe and V%, no correlation with productivity was observed. These results indicate that pre-conceived critical nutrient levels are mischaracterized in environments with a constructed soil profile. Increasing soil fertility in depth is essential for obtaining high soybean yields. Building soil fertility up to 60 cm deep appears to significantly reduce the critical level of nutrients in the soil in the surface layer for soybean cultivation.

Keywords: soybean production; soil chemistry; nutrients; plants nutrition; soil profile.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	7
2	MATERIAL E MÉTODOS	8
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
3.1	<i>Acidez ativa (pH)</i>	<i>11</i>
3.2	<i>Potássio</i>	<i>12</i>
3.3	<i>Magnésio</i>	<i>13</i>
3.4	<i>Cálcio</i>	<i>14</i>
3.5	<i>Acidez trocável (Al)</i>	<i>14</i>
3.6	<i>CTC</i>	<i>15</i>
3.7	<i>Fósforo</i>	<i>16</i>
3.8	<i>Enxofre</i>	<i>17</i>
3.9	<i>Boro</i>	<i>18</i>
3.10	<i>Cobre</i>	<i>18</i>
3.11	<i>Ferro</i>	<i>19</i>
3.12	<i>Manganês</i>	<i>20</i>
3.13	<i>Zinco</i>	<i>21</i>
3.14	<i>Saturação de bases</i>	<i>22</i>
3.15	<i>Matéria orgânica</i>	<i>22</i>
4	CONCLUSÕES	23
	REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

A sojicultura representa a principal fonte de divisas agrícolas para o Brasil. De fato, na safra 2022/2023 a cultura produziu cerca de 155 milhões de t (Mt) em 44 Mha (Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, 2023). Considerando a exportação de soja apenas no ano de 2023, foram arrecadados 53,244 bilhões de dólares, isso mostra sua importância econômica para o país (MAPA, 2024).

Produtos do complexo soja (farelo, óleo e grãos) representaram 21,36% das exportações brasileiras do agronegócio no mês de janeiro de 2024. Dessa parcela, 40,2% foram exportados para o mercado chinês, seguido por 13,8% para a União Europeia, e 10,03% para a Tailândia (BRASIL, 2024).

Ao longo dos anos, diversos fatores têm levado a maiores rendimentos na cultura da soja no Brasil. Pode-se afirmar que melhorias no manejo do solo merecem destaque entre esses fatores. Os patamares de produtividade alcançados ainda possuem elevado potencial de aumento, o que ressalta a importância de avaliações técnicas mais assertivas, para assim possibilitar o correto manejo da adubação (OLIVEIRA JUNIOR *et al.*, 2020).

Diagnosticar de maneira correta a fertilidade do solo e a disponibilidade de nutrientes, possibilita otimizar as doses de fertilizantes e corretivos, dessa forma, aumentar a produtividade e a lucratividade, além de evitar impactos ambientais por doses excessivas (CANTARELLA, 2022).

Nos ambientes com longa data de cultivo, onde o uso de insumos foi mais intenso, é comum encontrar a condição de fertilidade construída. Esse termo pode ser compreendido como condição de melhores atributos químicos de fertilidade do solo em áreas já cultivadas, onde foram aplicados fertilizantes e corretivos durante décadas. O efeito residual desses insumos é o que possibilita esse processo. Os indicadores da fertilidade construída, se referem aos teores de nutrientes superiores aos seus respectivos níveis críticos (RESENDE *et al.*, 2016). Áreas de soja com produtividades superiores a 5 400 kg.ha⁻¹ apresentam maiores volumes de raízes nas camadas de solo mais profundas que 40 cm (SAKO *et al.*, 2015). Para que seja possível o desenvolvimento do sistema radicular nessas profundidades, a construção da fertilidade do solo além da tradicional camada arável é essencial.

Nas últimas quatro décadas a produtividade da soja apresentou aumento de produtividade modesto quando comparado a outras culturas, como o milho, trigo e arroz, nesse contexto, Liu *et al.* (2020) destacam que para atender às demandas futuras de grãos, é necessário que haja uma nova Revolução Verde na cultura da soja a nível mundial. Soma-se a esse fato, que Cassman *et al.* (1999) concluíram que o aumento na demanda de

alimentos deve ser alcançado por meio do aumento de produtividade, com foco em minimizar a expansão de áreas de cultivo. Em solos de fertilidade construída, é de grande importância monitorar os teores de nutrientes, com o objetivo de adequar o manejo da fertilidade para a máxima eficiência técnica e econômica (LACERDA *et al.*, 2015).

O Comitê Estratégico Soja Brasil (CESB) é uma entidade sem fins lucrativos, formada por profissionais e pesquisadores de áreas diversas, com o objetivo de melhorar a sojicultura nacional, em busca de maiores produtividades. No ano de 2008 foi criado o Desafio Nacional de Máxima Produtividade da Soja, onde os produtores participantes buscam atingir maiores produtividades, com sustentabilidade e viabilidade econômica. Todos os produtores participantes do desafio, passam por auditorias para verificação dos dados declarados, como cultivar utilizada, adubação, manejo fitossanitário, condições físico-químicas do solo, e a produtividade alcançada (CESB, 2021), sendo que esses dados são publicados por meio de relatórios específicos para cada campeão de produtividade. Dessa forma, uma grande base de dados vem sendo gerada, entretanto, com pouca exploração acadêmica com objetivo de aprofundamento no entendimento de fatores ligados ao “ajuste fino” de produtividade na cultura da soja.

Nesse contexto, esse trabalho busca indicativos de que quando o objetivo é elevar a produtividade em ambientes de fertilidade construída, os níveis críticos de nutrientes estabelecidos pela literatura tradicional podem não ser acurados.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Dados de atributos do solo relacionados à fertilidade em áreas onde se alcançaram elevadas produtividade foram obtidos do Comitê Estratégico Soja Brasil para os concursos realizados entre as safras 2016/2017 e 2022/2023.

Em cada safra, os campeões foram divididos por região, sendo que até a safra 2020/2021, as regiões norte e nordeste foram agrupadas, e a partir da safra 2021/2022, individualizadas. As demais regiões (centro-oeste, sudeste e sul) sempre tiveram seu próprio campeão, entre esses, ainda é definido o campeão nacional de produtividade do desafio.

Análises de atributos químicos dos solos (Tabela 1) foram realizadas para amostras de solo das seguintes camadas: 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm. No total, 120 resultados de análises químicas de solo foram analisados, sendo que as análises estatísticas foram realizadas de maneira isolada em cada camada de solo.

Os participantes do desafio passam por uma auditoria para elaboração de um laudo que conta com: georreferenciamento da área auditada, descritivo do campo de produção,

informações técnicas de manejo, registro fotográfico, informações adicionais (caso existam), certificado com a classificação no desafio (CESB, 2021). Dessa forma, as informações contidas nos laudos são obtidas de maneira segura. Entre as informações disponibilizadas, estão as análises de solo, de onde os dados desse trabalho foram obtidos e posteriormente analisados. Os atributos químicos utilizados estão descritos na Tabela 1.

Os dados foram agrupados e organizados em planilha do Microsoft Excel. Para reduzir a influência das variações anuais e regionais de produtividade, a produtividade da soja foi relativizada, atribuindo-se à maior produtividade de cada safra como Produção Relativa de 100%, sendo as demais, relativizadas.

Tabela 1 – Atributos químicos do solo utilizados pelo CESB para a caracterização das áreas em termos de fertilidade em concurso de produtividade realizados entre as safras 2016-2017 e 2022-2023

Atributo	Unidade	Método
pH	$-\log [H^+]$	CaCl ₂
K	mmolc.dm ⁻³	Resina Mista
Mg	mmolc.dm ⁻³	Resina Mista
Ca	mmolc.dm ⁻³	Resina Mista
Al	mmolc.dm ⁻³	KCl 1,0 mol/L
CTC	mmolc.dm ⁻³	SB + (H+Al)
P	mg.dm ⁻³	Resina
S	mg.dm ⁻³	Fosfato Monocálcio
B	mg.dm ⁻³	Água quente
Cu	mg.dm ⁻³	DTPA
Fe	mg.dm ⁻³	DTPA
Mn	mg.dm ⁻³	DTPA
Zn	mg.dm ⁻³	DTPA
V	%	(SB x 100)/CTC
MO	g.dm ⁻³	Oxidação

$$SB = \sum K + Mg + Ca + Na; \text{ DTPA: Ácido dietilenotriaminopentacético.}$$

Investigou-se o relacionamento entre atributos químicos do solo, nas diferentes profundidades, com as produtividades alcançadas por meio de correlação de Pearson a 5% de probabilidade. Também se adotou a estatística descritiva (média, moda, máximo e mínimo) para tratamento dos dados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão descritas as produtividades absolutas e relativas dos campeões analisados nesse trabalho. Comparar esses resultados com a produtividade média do Brasil, que foi de 3507 kg.ha⁻¹ (58 sacas.ha⁻¹) (CONAB, 2023) evidencia certo potencial de aumento de produtividade de soja nas diferentes regiões brasileiras.

Tabela 2 – Produtividade absoluta e relativa de soja dos campeões dos concursos de produtividade entre as safras 2016/2017 e 2022/2023

Safra	Região	Produtividade Absoluta ---sc ha ⁻¹ ---	Produtividade Relativa ---%---
16/17	Centro Oeste	122,2	81,97
	Norte/Nordeste	95,76	64,23
	Sudeste	108,25	72,61
	Sul	149,08	100,00
17/18	Centro Oeste	100,44	79,08
	Norte /Nordeste	104,4	82,20
	Sudeste	108,96	85,79
18/19	Sul	127,01	100,00
	Centro Oeste	108,74	88,05
	Norte /Nordeste	96,89	78,45
	Sudeste	110,45	89,43
19/20	Sul	123,5	100,00
	Centro Oeste	103,19	86,85
	Norte /Nordeste	101,79	85,67
	Sudeste	118,63	99,84
20/21	Sul	118,82	100,00
	Centro Oeste	100,33	77,68
	Norte /Nordeste	113,26	87,69
21/22	Sudeste	113,99	88,25
	Sul	129,16	100,00
	Centro Oeste	117,14	92,35
	Nordeste	114,32	90,12
22/23	Norte	90,34	71,22
	Sudeste	126,85	100,00
	Sul	114,8	90,50
	Centro Oeste	106,01	78,84
22/23	Nordeste	119,71	89,03
	Norte	108,63	80,79
	Sudeste	134,46	100,00
	Sul	132,83	98,79

sc: sacas de 60 kg

3.1 Acidez ativa (pH)

A acidez ativa dos solos não se relacionou com as variações de produtividade de soja nas diferentes camadas de solo, apesar da ampla variação observada. Com média variando entre 5,33 na camada mais superficial (0-10) e 4,95 na camada mais profunda (40-60), a amplitude (máximo-mínimo) variou de 1,7 a 1,6 unidade, com valores máximos e mínimos alcançando 6,1 e 4,3, respectivamente. Considerando que são solos eletronegativos, a diferença entre o pH em CaCl_2 e em água deve se situar entre -0,4 e -0,7 unidades, assim para efeito de discussão podemos assumir que os valores mínimos e máximos de pH em água estariam entre 4,7-5,0 e 6,5-6,8 (Tabela 3).

A obtenção de elevadas produtividades de soja em solos com tamanha variação de acidez ativa, em alguns casos com valores de pH em CaCl_2 de 4,6 até 6,1 nas camadas superficiais, demonstra que a soja apresenta certa elasticidade quanto a esse atributo químico de solo. De fato, as raízes da soja são capazes de produzir alguns ácidos, como o cítrico, láctico e málico, sendo que cultivares mais tolerantes ao Al apresentam maior produção de ácido cítrico, que pode formar complexos com Al^{3+} reduzindo assim seus efeitos tóxicos à cultura em condições ácidas (MENOSSO *et al.*, 2001; RÖMHELD; MARSCHNER, 1984). A absorção de micronutrientes em ambientes com pH elevado, pode ser satisfatória pela soja, tendo em vista a capacidade da planta em acidificar a rizosfera (SOUZA *et al.*, 2010). Não obstante, Nolla *et al.* (2007) observaram que o crescimento de raízes e da parte aérea da soja foram menores em valores de pH entre 4,0 e 5,0 do que em valores de 5,0 e 6,0.

Em solos com elevada disponibilidade de P, a elevação do pH do solo pode aumentar a eficiência de uso deste nutriente pela soja (VIVIANI *et al.*, 2010). Por se tratar de ambientes com fertilidade construída, apesar das variações de pH, os elevados teores de P e matéria orgânica, associados a capacidade da soja em tolerar uma ampla variação nos valores de pH, podem ter favorecido a não correlação desse atributo com a produtividade.

Tabela 3 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre valores da acidez ativa (pH) de solos e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,142 ^{ns}	5,18	4,6	6,1	5,4
10-20	0,142 ^{ns}	4,95	4,4	6,1	5,2
20-40	0,203 ^{ns}	4,88	4,4	6,0	5,0
40-60	0,064 ^{ns}	4,81	4,3	5,9	5,1

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.2 Potássio

Os teores disponíveis de K correlacionaram-se positivamente, nas diferentes camadas de solo, com as produtividades de soja (Tabela 4). Apesar da mesma significância (5%) os coeficientes foram maiores nas camadas mais superficiais. Elevadas produtividades foram obtidas em solos com teor de K muito abaixo dos níveis críticos tradicionais.

Considerando que o nível crítico para K é de 3 mmol_c.dm⁻³ (CANTARELLA *et al.*, 2022), nesse trabalho os valores médios encontrados foram ligeiramente inferiores. Como houve correlação positiva em todas as profundidades, isso indica que os níveis críticos definidos na literatura não devem ser considerados como preditivos. Muitos fatores podem impactar na influência do teor de um nutriente com as respostas das plantas, como exemplo, a umidade do solo e o teor de K apresentam efeito compensatório entre si, ou seja, maiores disponibilidades de K podem reduzir impactos da deficiência hídrica, o inverso também é válido (SERAFIM *et al.*, 2012). Porém, neste caso, atenção especial é dada para a elevação do teor de K em camadas subsuperficiais de solo, onde não havendo restrição para o crescimento radicular potencializará a capacidade de aquisição do nutriente pela soja.

Tabela 4 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de K em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente (mmol_c.dm⁻³)

Camada (cm)	R	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,540*	3,23 (126)	0,8	9,7	1,9	79,432 + 2,6412x
10-20	0,545*	2,54 (99)	0,5	6,7	1,1	79,639 + 3,2841x
20-40	0,473*	1,76 (69)	0,4	4,8	1,2	80,925 + 4,0018x
40-60	0,395*	1,15 (45)	0,3	3,4	0,4	82,421 + 4,8351x

Média 2,17 (85 mg dm⁻³) n = 120; *, correlação significativa a 5% de probabilidade

3.3 Magnésio

Por meio da correlação de Pearson, foi observado que o teor de Mg em todas as camadas de solo apresentou correlação positiva com o aumento da produtividade. Os valores médios entre camadas variaram de 7,43 até 15,10 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$, sendo em muitos casos os teores baixos nas camadas subsuperficiais, fato demonstrado pelo mínimo de 1 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$ nas camadas 20-40 e 40-60 cm. Já os teores máximos encontrados apresentaram menores amplitudes, variando de 25 na camada 20-40 até 38 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$ na camada 40-60 cm.

O nível crítico de Mg é de 8 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$ (CANTARELLA *et al.*, 2022). As medianas e as médias obtidas nas camadas 0-10 e 10-20 cm foram superiores a esse valor, além do coeficiente de Pearson positivo para todas as camadas. Isso aponta para possibilidade de que em ambientes de alta produtividade, teores de 8 $\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$ podem ser insuficientes.

O Mg é um nutriente de grande importância para as culturas agrícolas, sendo mais eficiente que o Ca na redução da rizotoxidez do Al na cultura da soja, esse fato pode contribuir para explicar a relação positiva entre os teores de Mg e a produtividade das lavouras de soja nos casos analisados (SILVA *et al.*, 2005).

Cabe destacar que apesar de os teores de Mg terem se correlacionado de maneira positiva com a produtividade, altos teores do nutriente podem inibir a absorção de Zn e de Mn pela soja, característica que pode variar entre genótipos (MOREIRA *et al.*, 2003).

Tabela 5 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Mg em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,502*	15,10	4	31	13	77,496 + 0,6944x
10-20	0,474*	12,47	5	36	11	79,737 + 0,6613x
20-40	0,537*	9,23	1	25	4	80,771 + 0,7809x
40-60	0,423*	7,43	1	38	3	84,146 + 0,5159x

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significativa a 5% de significância

3.4 Cálcio

Os teores de Ca apresentaram correlação positiva a produtividade da soja nas camadas 0-10 e 10-20 cm. Nas demais profundidades, não houve correlação significativa. Os valores médios variaram de 17,83 a 43,77 mmol_c.dm⁻³, sendo mínimos de 4 a 17 mmol_c.dm⁻³ e máximos de 70 a 84 mmol_c.dm⁻³.

Os teores de Ca e Mg tendem a se tornar mais homogêneos no perfil do solo ao longo dos anos de sistema de plantio direto (MOREIRA *et al.*, 2001). A formação de complexos de Ca com compostos orgânicos pode promover aumento em sua mobilidade no perfil do solo (FRANCHINI *et al.*, 1999) fato que pode contribuir para o incremento dos teores de Ca em profundidade. Os resultados desse trabalho demonstraram que mesmo em áreas já estabelecidas, ainda pode haver um nítido gradiente de Ca ao longo do perfil.

O melhor parâmetro para interpretação da disponibilidade de Ca no solo é por meio da saturação por bases (CANTARELLA *et al.*, 2022), entretanto, nesse trabalho o fato de haver correlação positiva entre o aumento da produtividade e o teor de Ca no solo, demonstra que considerar seus teores é importante para o manejo.

Tabela 6 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Ca em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	R	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,466*	43,77	17	84	34	75,492 + 0,2853x
10-20	0,396*	36,93	12	70	29	79,482 + 0,2301x
20-40	0,334 ^{ns}	27,03	7	83	9	-
40-60	0,312 ^{ns}	17,83	4	97	9	-

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significativa a 5% de significância ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.5 Acidez trocável (Al)

A acidez trocável dos solos não apresentou relação significativa com a produtividade da soja em nenhuma das camadas. As médias variaram de 0,31 até 1,11 mmol_c.dm⁻³, enquanto o valor mínimo foi igual a 0 em todas as camadas. De fato o Al se precipita em valores de pH superiores a 5,5, que foram encontrados como valores máximos em todas as camadas analisadas. Os máximos variaram de 12 até 5,0 mmol_c.dm⁻³. Em linhas gerais, como esperado, menores teores de Al foram encontrados nas camadas superficiais.

O Al pode ser considerado como um dos principais responsáveis pelo baixo desenvolvimento de cultivos comerciais em solos ácidos, sendo a espécie Al^{3+} a mais tóxica. O principal sintoma de sua rizotoxidez é a redução do desenvolvimento radicular, sendo que a sensibilidade das plantas ao Al é variável conforme o genótipo, e pode ser controlada por um único gene dominante, ou mesmo por genes de efeitos aditivos (ECHART *et al.*, 2001).

A quelatização do Al por grupamentos aniônicos de ácidos orgânicos, como os ácidos cítrico e málico produzidos por células radiculares da planta de soja e exudados na rizosfera representa importante mecanismo de contenção da sua rizotoxidez nesta cultura. Outro meio de minimização de seus danos utilizado pela soja, é por meio do acúmulo de Al nas paredes das células externas do ápice radicular, isso pode contribuir para uma certa tolerância da soja a presença de Al no solo (ANDRADE, 2022).

Tabela 7 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Al em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente ($mmol\cdot dm^{-3}$)

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,103 ^{ns}	0,31	0	5,0	0
10-20	0,148 ^{ns}	0,93	0	12,0	0
20-40	0,083 ^{ns}	1,11	0	11,0	0
40-60	0,112 ^{ns}	0,80	0	9,0	0

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.6 CTC

A CTC nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm correlacionaram-se positivamente com a produtividade da soja, já na camada 40-60 cm não houve correlação. Os valores médios variaram de 63,0 a 96,0 $mmol\cdot dm^{-3}$, os mínimos de 24,6 a 37,9 $mmol\cdot dm^{-3}$, e os máximos de 247,1 a 301,1. A CTC pode ser entendida como uma característica físico-química dos solos que quantifica a capacidade do solo em reter cátions. É fato que a CTC encontrada em grande parte dos solos brasileiros apresenta grande dependência da matéria orgânica (VAN RAIJ *et al.*, 1969). Isso explica a redução nos valores da CTC nas camadas de solo subsuperficiais, já que os teores de matéria orgânica também decrescem. A adoção do sistema de plantio direto pode resultar em incrementos na CTC dos solos, principalmente nas camadas superficiais, isso ocorre especialmente devido ao acúmulo de matéria orgânica. Em solos do estado do Paraná sob sistema de plantio direto, a CTC efetiva apresentou até

85% de aumento em comparação ao mesmo solo sob sistema de cultivo convencional (CIOTTA *et al.*, 2003).

Inácio (2023) não encontrou correlação entre a CTC e a produtividade da soja em uma área comercial no terceiro ano de cultivo, enquanto Londero *et al.* (2020) encontraram correlação negativa.

Tabela 8 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre os valores de CTC em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,419*	96,0	37,9	231,8	84,1	76,919 + 0,1152x
10-20	0,420*	91,3	35,6	247,1	Amodal	78,501 + 0,1038x
20-40	0,392*	77,7	29,7	265,2	50,3	81,063 + 0,089x
40-60	0,343 ^{ns}	63,0	24,6	301,1	55,0	-

Y = Produtividade relativa (%); r = coeficiente da correlação; * = significativa a 5% de significância ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.7 Fósforo

Os teores de P não se relacionaram com a produtividade da soja em nenhuma das profundidades. Os valores médios variaram de 5,4 a 52,0 mg dm⁻³, enquanto os mínimos variaram de 2,0 a 10,0 mg dm⁻³ e os máximos de 24 a 176 mg dm⁻³, indicando uma ampla faixa de variação.

Entre os macronutrientes, o P é, em geral um dos menos exigidos pela cultura da soja. O nível crítico estabelecido para P é de 40 mg dm⁻³ para culturas anuais (CANTARELLA *et al.*, 2022). Os valores médios encontrados nos solos foram superiores a esse valor, como não houve correlação positiva entre a produtividade da soja e o teor de P nos solos, entende-se que os teores encontrados foram suficientes para promover elevadas produtividades de soja. Nas áreas onde os teores se encontraram abaixo do nível crítico, a construção de perfil e elevação dos teores de matéria orgânica podem ter favorecido à nutrição da planta com P. Além de que o fato de haver P em profundidade pode ter diminuído o nível crítico na camada 0-20 cm, o que justificaria elevadas produtividades mesmo com baixos teores nessa camada.

A diagnose da disponibilidade de P em áreas sob sistema de plantio direto ainda possui margens para melhorias, especialmente considerando o volume de solo nas camadas subsuperficiais, onde o sistema radicular das plantas expressa elevada exploração. Um dos problemas no manejo do P tem origem na implantação inadequada do sistema, com

aplicações apenas superficiais à lanço, esse fato associado à baixa mobilidade do P no solo mais intemperizados concentra o elemento em camadas superficiais e escassez em camadas subsuperficiais (SANTOS *et al.*, 2008). A escassez em subsuperfície pode ser associada ao fato de que em solos com baixa ou nenhuma adição de P as formas orgânicas são as principais reservas para o fornecimento desse elemento às plantas, as formas de P recalitrantes também liberam P para a solução, mas de forma insuficiente para a nutrição adequada (GATIBONI *et al.*, 2007). Londero *et al.* (2020) encontraram correlação positiva entre os teores de P e a produtividade da soja. Nos casos de ambientes já ricos em P Cantarella *et al.* (2022) destacam que a manutenção da fertilidade em P deve ser feita por meio do uso de fontes solúveis, de preferência granulados e no sulco de semeadura. Porém, fosfatos naturais reativos também podem ser posicionados para tais condições, aplicados também de forma localizada, como farelo ou pó.

Tabela 9 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de P em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,131 ^{ns}	52,0	10,0	176	50
10-20	-0,062 ^{ns}	35,5	7,0	110	16
20-40	-0,063 ^{ns}	16,1	3,2	39	18
40-60	0,290 ^{ns}	5,4	2,0	24	7

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.8 Enxofre

Não foi observada relação entre os teores de S e a produtividade da soja em nenhuma das profundidades. As médias variaram de 14,3 até 50,0 mg.dm⁻³, enquanto os máximos de 39 a 175 mg dm⁻³, e os mínimos de 2 a 8 mg dm⁻³.

O nível crítico para S é de 10 mg dm⁻³ (CANTARELLA, 2022), no presente estudo, em média os solos apresentaram valores superiores. Em solos agrícolas que receberam fontes externas de S, a maior concentração de sulfato ocorre nas camadas subsuperficiais, fato que pode ser observado nos valores obtidos por esse trabalho. A prática da gessagem foi muito comum entre os casos campeões de produtividade de soja, sendo que entre todos os casos, apenas sete não a fizeram.

Tabela 10 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de S em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	-0,069 ^{ns}	14,3	2	39	11
10-20	-0,070 ^{ns}	17,4	2	55	14
20-40	0,245 ^{ns}	29,0	4	89	10
40-60	0,234 ^{ns}	50,0	8	175	44

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.9 Boro

Não foi observada relação entre os teores de B e a produtividade da soja em nenhuma das camadas de solo. Os valores médios encontrados variaram de 0,5 até 1,3 mg dm⁻³, os mínimos de 0,1 até 0,3 mg dm⁻³, e máximos de 1,1 até 6,7 mg dm⁻³.

O nível crítico de B estabelecido para culturas anuais é de 0,6 mg dm⁻³ (CANTARELLA *et al.*, 2022). Os teores médios encontrados nesse trabalho, se situam acima do nível crítico, além disso, não houve correlação positiva entre os teores de B e a produtividade da cultura. Segundo Rosolem *et al.* (2008) não foi possível discriminar respostas da soja a partir dos teores de B na camada 0-15 cm do solo, mesmo com uso de três métodos de extração: água quente modificada ou BaCl₂, solução de CaCl₂, água quente tradicional.

Tabela 11 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de B em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,145 ^{ns}	0,9	0,33	2,46	1,20
10-20	0,255 ^{ns}	1,3	0,21	6,70	0,40
20-40	0,224 ^{ns}	0,7	0,10	1,09	0,44
40-60	0,016 ^{ns}	0,5	0,17	1,17	0,34

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.10 Cobre

Os teores disponíveis de Cu relacionaram-se positivamente com a produtividade da soja em todas as profundidades analisadas. Além da significância, foi observado um aumento no valor do coeficiente de nas camadas 20-40 e 40-60 cm. Os valores médios, se situaram entre 0,68 e 2,28 mg dm⁻³, os mínimos entre 0,0 e 0,2 mg dm⁻³ e os máximos entre 5,9 e 8,1 mg dm⁻³.

O nível crítico estabelecido para culturas anuais para Cu é de $0,8 \text{ mg dm}^{-3}$ (CANTARELLA *et al.*, 2022). Nesse trabalho, as médias foram superiores a esse valor. O coeficiente de correlação de Pearson, destaca a importância do fornecimento desse micronutriente via solo, além de que a correlação significativa em todas as profundidades, demonstra a sua influência na produtividade nas condições analisadas até a profundidade de 60 cm, o que indica a importância da construção de perfil de solo para esse elemento.

Cabe ressaltar que apesar de o Cu ser um elemento essencial, seu excesso causa toxidez por meio da produção de radicais livres o que leva a danos nas estruturas celulares. Logo, apesar de apresentar correlação positiva com a produtividade da soja, deve haver cuidado com o seu excesso, indicando a necessidade de novos estudos acerca de seu nível crítico (CRUZ *et al.*, 2022). Comparativamente ao Fe, Mn e Zn, o Cu apresentou o menor fluxo difusivo em latossolos, sendo encontrado principalmente sob formas aniônicas (PEGORARO *et al.*, 2006), essa dificuldade de se difundir pode ter relação com maiores dificuldades em suprir a demanda das plantas, logo, teores mais elevados podem facilitar esse processo.

Tabela 12 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Cu em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,470*	2,28	0,2	8,1	0,6	$82,837 + 2,2494x$
10-20	0,419*	1,50	0,1	7	1,0	$83,969 + 2,6609x$
20-40	0,626*	1,28	0,1	5,9	0,1	$82,253 + 4,4753x$
40-60	0,485*	0,68	0	6	0,2	$85,051 + 4,2671x$

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significante a 5% de significância

3.11 Ferro

Não foi observada relação entre os teores de Fe e a produtividade da soja em nenhuma das camadas de solo. Os valores médios encontrados foram de 15,77 até 32,76 mg.dm^{-3} , os mínimos foram entre 2 e 11 mg.dm^{-3} , e os máximos entre 136 e 210 mg.dm^{-3} .

Há recomendações de teores de Fe superiores a 12 mg dm^{-3} . Em condições tropicais, deficiências de Fe são incomuns à campo, mas ocorrem em cultivos protegidos, quando há uso de substratos pobres no nutriente (CANTARELLA *et al.*, 2022). Os teores médios encontrados nesse trabalho foram superiores ao nível crítico.

Em linhas gerais, em Latossolos geralmente os teores de Fe disponível são elevados. De fato, em análises de Latossolos sob SPD e sob cultivo convencional, os teores de Fe variaram de 18 a 48 mg dm⁻³, o que indica que deficiências com este nutriente tendem a ser raras nesses ambientes (CASTRO *et al.*, 1992).

Tabela 13 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Fe em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,046 ^{ns}	32,73	2	210	11
10-20	-0,024 ^{ns}	32,76	11	162	25
20-40	0,061 ^{ns}	28,2	7	182	22
40-60	0,136 ^{ns}	15,77	3	136	10

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.12 Manganês

O teor de Mn disponível apresentou relação significativa com a produtividade da soja nas camadas 0-10, 10-20 e 20-40 cm. Os valores médios encontrados foram entre 1,67 e 5,01 mg dm⁻³, os mínimos entre 0,2 e 0,4 mg dm⁻³, e os máximos entre 22 e 40 mg dm⁻³.

O nível crítico estabelecido para o Mn é de 5,0 mg dm⁻³ (CANTARELLA *et al.*, 2022). Nesse trabalho, apesar das médias muito elevadas, encontraram-se teores muito baixos conferindo elevada produtividade à cultura. A correlação de Pearson positiva até a camada 20-40 cm confirma a importância de teores satisfatórios mesmo nas camadas subsuperficiais, para casos de elevada produtividade, ao mesmo tempo que mesmo em condições de teores inferiores ao nível crítico, houve elevadas produtividades.

Condições de deficiência de Mn são frequentes em solos alcalinos, situação comum em casos de supercalagem, ou em solos formados em condições de drenagem deficiente (CANTARELLA *et al.*, 2022). Em latossolos a difusão de Mn ocorre predominantemente sob forma catiônica, sendo que elevadas doses de corretivos reduzem seu fluxo difusivo, mas quando comparado ao Fe, Zn e Cu, é o nutriente com o maior fluxo (PEGORARO *et al.*, 2006). Apesar de ser um elemento essencial, em níveis muito elevados a toxidez por Mn deve ser considerada, sendo inclusive um problema em regiões de solos ácidos e ou mal drenados (MILLALEO *et al.*, 2010).

Tabela 14 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Mn em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	R	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,371*	4,55	0,40	39,8	1,6	85,826 + 0,4736x
10-20	0,418*	5,01	0,20	40	1,6	85,727 + 0,4492x
20-40	0,397*	2,91	0,2	30	0,8	86,091 + 0,6481x
40-60	0,334 ^{ns}	1,67	0,2	22	0,2	-

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significativa a 5% de significância; ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.13 Zinco

O teor de Zn disponível apresentou relação significativa para produtividade de soja apenas na camada 40-60 cm. Os valores médios encontrados foram de 0,34 até 3,36 mg dm⁻³, os mínimos de 0,0 até 0,2 mg dm⁻³, e os máximos de 1,8 até 14,9 mg dm⁻³.

Os fluxos difusivos de Zn nos latossolos ocorrem predominantemente em forma catiônica, entretanto, tal fluxo tende a reduzir quando elevadas doses de corretivos de acidez são aplicadas ao solo. Resíduos vegetais são capazes de mitigar essa redução, o que favorece sua disponibilidade para as plantas (PEGORARO *et al.*, 2006).

O nível crítico estabelecido para os teores de Zn no solo é de 1,2 mg dm⁻³ (CANTARELLA *et al.*, 2022). Nesse trabalho, mesmo com teores inferiores aos indicados, houve produtividades de soja muito elevadas. Nesse sentido, a construção de perfil de solo, que possibilita o acesso das raízes a nutrientes em camadas subsuperficiais pode ter contribuído para satisfazer a demanda das plantas nessas situações.

Tabela 15 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores disponíveis de Zn em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,057 ^{ns}	3,36	0,2	14,9	2,9	-
10-20	-0,037 ^{ns}	2,31	0,2	12,9	1,1	-
20-40	0,075 ^{ns}	0,92	0,0	2,5	0,8	-
40-60	0,431*	0,34	0,0	1,8	0,5	83,512 + 12,891x

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significativa a 5% de significância; ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.14 *Saturação de bases*

O valor de V% não apresentou relação com a produtividade de soja em nenhuma das camadas analisadas. Os valores médios encontrados variaram de 38,93 até 64,9%, os valores mínimos de 16 a 45%, e os máximos de 69 até 84%, com moda variando de 33 até 54.

A saturação por bases desejada na camada 0-20 é de 70%. Já na camada 20-40, é recomendado 40% (CANTARELLA *et al.*, 2022). Considerando os valores encontrados nesse trabalho, a saturação na camada 0-10 cm se encontra próxima ao recomendado, enquanto na camada subsuperficial esses valores estão ligeiramente inferiores.

Tabela 16 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre valores de V% em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda
0-10	0,223 ^{ns}	64,9	45	84	54
10-20	0,106 ^{ns}	57,0	38	83	41
20-40	0,245 ^{ns}	47,1	20	76	37
40-60	0,220 ^{ns}	38,9	16	69	33

ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

3.15 *Matéria orgânica*

Para o teor de M.O.S, foi encontrada relação significativa com a produtividade da soja em todas as profundidades. Os valores médios variaram de 15,43 até 31,40 g kg⁻¹, os mínimos de 2 até 9 g kg⁻¹, e os máximos de 48 até 64 g kg⁻¹.

A correlação positiva entre os teores MOS com a produtividade de soja pode estar associada com diferentes aspectos, por exemplo, ao aumento na eficiência do uso dos nutrientes pelas plantas (COSTA *et al.*, 2013). De fato, a matéria orgânica do solo apresenta capacidade de formar complexos com diversos cátions, entre eles o Al³⁺ (GOLDBERG *et al.*, 1996). Em solos muito intemperizados, a importância da MOS na geração de CTC é elevada. Van Raij *et al.* (1969) reportaram que em solos bem drenados do estado de SP, a matéria orgânica foi responsável por entre 56 a 91% da CTC.

Os estoques de C-orgânico total apresentam relação positiva com o aumento do tempo de adoção de SPD, principalmente na camada 0-20 cm, além disso, melhorias em índices físicos como a resistência a penetração e a relação micro/macroporos, também têm sido observados (REIS *et al.*, 2016).

Tabela 17 – Coeficiente de correlação de Pearson para o relacionamento entre teores de M.O em diferentes camadas de solo e produtividade em propriedades campeãs de produtividade para concursos CESB das safras 2016-2017 a 2022-2023 e estatística descritiva correspondente

Camada (cm)	r	Média	Mínimo	Máximo	Moda	Y
0-10	0,488*	31,4	9	63	31	$76,322 + 0,3713x$
10-20	0,387*	26,9	5	64	22	$79,979 + 0,2971x$
20-40	0,449*	21,5	2	64	15	$80,228 + 0,3606x$
40-60	0,409*	15,4	5	48	9	$81,456 + 0,4228x$

Y = Equação; r = coeficiente da correlação de Pearson; * = significativa a 5% de significância; ns: correlação não significativa a 5% de probabilidade

4 CONCLUSÕES

A elevação da fertilidade além da camada arável tradicional (0-20cm) descaracteriza os níveis críticos de nutrientes pré-concebidos para a cultura da soja.

Melhorias na fertilidade do solo até 60 cm de profundidade são importantes para obtenção de elevadas produtividades de soja.

A obtenção de elevadas produtividades em solos com baixos teores de nutrientes, deve-se a sua maior distribuição no perfil.

Há margem expressiva para aumento na produtividade média de soja no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ADILSON DE OLIVEIRA JUNIOR (Londrina). Fertilidade do solo e avaliação do estado nutricional da soja. In: EMBRAPA. Embrapa soja: Tecnologias de Produção de Soja. Londrina: 17 ed. 2020. p. 133-184. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1128401>. Acesso em: 09 abr. 2024.
- ANDRADE, Renata, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2022. Caracterização morfofisiológica e metabólica de raízes de soja expostas ao alumínio. Orientador: Cleberon Ribeiro. Coorientadores: Danielle Santos Brito, Genaina Aparecida de Souza e Maximiller Dal Bianco Lamas Costa.
- BRASIL. Resultados do Comércio Exterior Brasileiro – Dados Consolidados [Brasília]: Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços: Disponível em: map. Acesso em: 29 mar. 2024.
- CANTARELLA, Heitor *et al.* Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo (Boletim 100). 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2022. 489 p.
- CASSMAN, Kenneth G. *et al.* Ecological intensification of cereal production systems: yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, [S.L.], v. 96, n. 11, p. 5952-5959, 25 maio 1999. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.96.11.5952>. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/epdf/10.1073/pnas.96.11.5952>. Acesso em: 12 mar. 2024.
- CASTRO, Orlando Melo de *et al.* Teores de zinco, cobre, manganês e ferro em dois latossolos sob plantio direto e convencional. *Bragantia*, [S.L.], v. 51, n. 1, p. 77-84, 1992. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051992000100011>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051992000100011>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- CESB (Sorocaba) (org.). O CESB. 2021. Disponível em: <https://www.cesbrasil.org.br/cesb/>. Acesso em: 30 mar. 2024.
- CIOTTA, Marlise Nara *et al.* Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 1161-1164, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782003000600026>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000600026>. Acesso em: 08 abr. 2024.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 11, safra 2023/24, n. 2 segundo levantamento, novembro 2023.
- COSTA, Elaine Martins da *et al.* Matéria Orgânica no Solo e seu Papel na Manutenção da Produtividade dos Sistemas Agrícolas. Goiânia: Enciclopédia Biosfera, 2013. 1842 p. Disponível em: <https://conhecer.org.br/ojs/index.php/biosfera/article/view/3167>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- CRUZ, Flávio José Rodrigues *et al.* Copper Toxicity in Plants: nutritional, physiological, and biochemical aspects. *Advances In Plant Defense Mechanisms*, [S.L.], p. 1-13, 14 dez. 2022.

IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105212>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105212>. Acesso em: 23 mar. 2024.

ECHART, Cinara Lima *et al.* Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 31, n. 3, p. 531-541, jun. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782001000300030>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782001000300030>. Acesso em: 23 mar. 2024.

FRANCHINI, Júlio Cezar *et al.* Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S.L.], v. 34, n. 12, p. 2267-2276, dez. 1999. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x1999001200014>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999001200014>. Acesso em: 18 abr. 2024.

GATIBONI, Luciano Colpo *et al.* Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 31, n. 4, p. 691-699, ago. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832007000400010>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000400010>. Acesso em: 08 abr. 2024.

GOLDBERG, Sabine *et al.* *Environmental chemistry of aluminum-organic complexes*. 2. ed. [S.I]: Garrison Sposito, 1996. Disponível em: https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20360500/pdf_pubs/P1381.pdf. Acesso em: 23 mar. 2024.

INACIO, Karini Aparecida de Matos. VARIABILIDADE ESPACIAL DA PRODUTIVIDADE DA SOJA E SUA CORRELAÇÃO COM ATRIBUTOS QUÍMICOS E TEXTURA DO SOLO. 2023. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Agronomia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/handle/prefix/5438>. Acesso em: 08 abr. 2024.

LACERDA, Julian Junio de Jesús *et al.* Adubação, produtividade e rentabilidade da rotação entre soja e milho em solo com fertilidade construída. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S.L.], v. 50, n. 9, p. 769-778, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2015000900005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/SdMHdhQFCVymqxRvXdwLXrM/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 27 fev. 2024.

LIU, Shulin; ZHANG, Min; FENG, Feng; TIAN, Zhixi. Toward a “Green Revolution” for Soybean. *Molecular Plant*, [S.L.], v. 13, n. 5, p. 688-697, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molp.2020.03.002>. Disponível em: [https://www.cell.com/molecular-plant/pdf/S1674-2052\(20\)30064-2.pdf](https://www.cell.com/molecular-plant/pdf/S1674-2052(20)30064-2.pdf). Acesso em: 12 mar. 2024.

LONDERO, Ricardo *et al.* Dependência espacial da fertilidade do solo sob plantio direto e suas relações com a produtividade da soja. *Caderno de Ciências Agrárias*, [S.L.], v. 12, p. 1-8, 29 nov. 2020. Universidade Federal de Minas Gerais - Pro-Reitoria de Pesquisa. <http://dx.doi.org/10.35699/2447-6218.2020.25450>. Disponível em: <https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/25450>. Acesso em: 08 abr. 2024.

MENOSSO, Orival Gastão *et al.* Crescimento radicular e produção de ácidos orgânicos em cultivares de soja com diferentes tolerâncias ao alumínio. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S.L.], v. 36, n. 11, p. 1339-1345, nov. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2001001100003>. Acesso em: 06 abr. 2024.

MILLALEO, R *et al.* MANGANESE AS ESSENTIAL AND TOXIC ELEMENT FOR PLANTS: transport, accumulation and resistance mechanisms. *Journal Of Soil Science And Plant Nutrition*, [S.L.], v. 10, n. 4, p. 470-481, 2010. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-95162010000200008>. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162010000200008>. Acesso em: 23 mar. 2024.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. AGROSTAT – Estatísticas de Comércio Exterior do Agronegócio Brasileiro. Disponível em: <https://indicadores.agricultura.gov.br/agrostat/index.htm>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MOREIRA, Adônis *et al.* Influência do magnésio na absorção de manganês e zinco por raízes destacadas de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S.L.], v. 38, n. 1, p. 95-101, jan. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2003000100013>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000100013>. Acesso em: 22 mar. 2024.

MOREIRA, S. G. *et al.* Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade de milho e soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 71-81, mar. 2001. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832001000100008>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Nzs65TV8PNd6YK8c9vg6DpB/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 17 mar. 2024.

NOLLA, Antonio *et al.* Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 30, n. 3, p. 475-483, jun. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832006000300009>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300009>. Acesso em: 23 mar. 2024.

PEGORARO, Rodinei Facco *et al.* Fluxo difusivo e biodisponibilidade de zinco, cobre, ferro e manganês no solo: influência da calagem, textura do solo e resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 30, n. 5, p. 859-868, out. 2006. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832006000500012>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000500012>. Acesso em: 16 abr. 2024.

REIS, Diony Alves *et al.* Qualidade física e frações da matéria orgânica de um Planossolo sob sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, [S.L.], v. 51, n. 9, p. 1623-1632, set. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900062>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900062>. Acesso em: 17 abr. 2024.

RESENDE, Álvaro Vilela de *et al.* Solos de Fertilidade Construída: Características, funcionamento e manejo. *Nutrição de Plantas*. Piracicaba, p. 1-19. Dez. 2016.

RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H.. Plant-induced pH changes in the rhizosphere of “Fe-efficient” and “Fe-inefficient” soybean and corn cultivars. *Jornal Of Plant Nutrition*. [S.L.], p.

623-630. nov. 1984. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/01904168409363227>. Acesso em: 06 abr. 2024.

ROSOLEM, Ciro Antonio *et al.* Boro disponível e resposta da soja em latossolo vermelho-amarelo do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 32, n. 6, p. 2375-2383, dez. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832008000600016>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600016>. Acesso em: 23 mar. 2024.

SAKO, Henry *et al.* Relações de Enraizamento e Cálcio no Solo para Alta Produtividade da Safra 15/16 (Boletim Técnico 1). Sorocaba: CESB, 2015.

SANTOS, Danilo Rheinheimer dos *et al.* Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, [S.L.], v. 38, n. 2, p. 576-586, abr. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-84782008000200049>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782008000200049>. Acesso em: 07 abr. 2024.

SERAFIM, Milson Evaldo *et al.* Umidade do solo e doses de K na cultura da soja. *Revista Ciência Agronômica*, [S.L.], v. 43, n. 2, p. 222-227, jun. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1806-66902012000200003>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000200003>. Acesso em: 21 mar. 2024.

SILVA, Ivo Ribeiro da *et al.* Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 29, n. 5, p. 747-754, out. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000500010>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000500010>. Acesso em: 22 mar. 2024.

SOUZA, Luiz Humberto *et al.* Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 1641-1652, out. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832010000500017>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000500017>. Acesso em: 21 mar. 2024.

VAN RAIJ, Bernardo *et al.* A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. *Bragantia*, [S.L.], v. 28, n., p. 85-112, jan. 1969. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87051969000100008>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051969000100008>. Acesso em: 23 mar. 2024.

VIVIANI, Carlos Alberto *et al.* Disponibilidade de fósforo em dois latossolos argilosos e seu acúmulo em plantas de soja, em função do aumento do pH. *Ciência e Agrotecnologia*, [S.L.], v. 34, n. 1, p. 61-67, fev. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-70542010000100007>. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000100007>. Acesso em: 21 mar. 2024.